



Fot. 1. Widok ogólny Laboratorium Fermiego (bez Fermi Main Injector)

Udział geodezji w eksperymentach  
fizyki cząstek elementarnych

# Z teodolitem do wnętrza atomu

GEORGE JERZY WÓJCIK

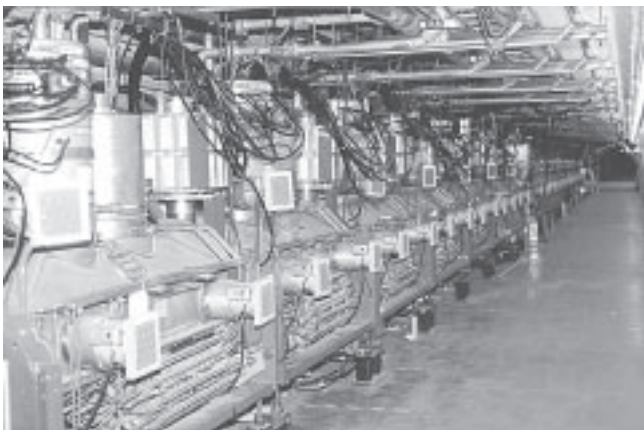
Tylko nadanie cząstkom przyświelnych prędkości, czyli olbrzymiej energii, pozwala na uzyskanie w laboratorium warunków, jakie panowały w ułamkach sekundy po tzw. Wielkim Wybuchu (Big Bang), który najnowsze teorie uważają za początek wszechświata. Bez udziału geodetów dokładne ustawienie elementów akceleratorów byłoby niemożliwe.



Fot. 2. Główne biuro (High Rise)

Fermi National Accelerator Laboratory to ośrodek naukowo-badawczy fizyki wysokich energii położony na zachodnich przedmieściach Chicago – jeden z największych tego typu obiektów na świecie. Instytut został nazwany imieniem Enrico Fermiego – wielkiego fizyka włoskiego, jako uhonorowanie jego prac badawczych na terenie Stanów Zjednoczonych. Doświadczenia przeprowadzane w Laboratorium mają na celu poznanie mechanizmu powstania wszechświata i budowy materii. Dokonano tu wielu przełomowych odkryć w dziedzinie fizyki cząstek elementarnych, włączając niedawne odkrycie ostatniego z legendarnych rodzajów kwarków – kwarku zwanego szczytowym (*top*) lub prawdziwym (*true*). [Na zdjęciach 1 i 2 pokazano widok ogólny i główne biuro ośrodka.]

Zakrojone na wielką skalę eksperymenty trwające niejednokrotnie kilka lat wymagają stałej obsługi geodezyjnej, której celem jest ustawienie elementów tej potężnej maszyny w żądanym przez fizyków miejscu w przestrzeni. Ponieważ urządzenia te pozwalają na nadanie cząstkom



Fot. 3. Elementy przyspieszające wiązkę cząstek elementarnych (Tevatron Sector F)

prędkości przyświatlnych, dokładne wyznaczenie położenia poszczególnych ich elementów jest warunkiem koniecznym sprawnego przebiegu eksperymentów. Oczywiście tylko nadanie cząstkom tak dużej prędkości, czyli olbrzymiej energii, pozwoli na uzyskanie w laboratorium warunków, jakie panowały w ułamkach sekundy po tzw. Wielkim Wybuchu (Big Bang), który najnowsze teorie uważają za początek wszechświata.

### Jak działa Laboratorium Fermiego?

Aby zrozumieć działanie laboratorium wysokich energii, trzeba spojrzeć na rys. 1, na którym schematycznie pokazano rozmieszczenie tuneli (z uwzględnieniem budowanego akceleratora Fermi Main Injector), gdzie przeprowadzane są poszczególne eksperymenty. Wiązka elektronów produkowana przez liniowy akcelerator gazowy (Linac) przechodzi przez pierwsze „koło rozpędowe”

(Booster), a następnie rozprowadzana jest do P Source (gdzie akumulowany jest antyproton) oraz do akceleratorów: Main Injector i Tevatron. Przyspieszona tam wiązka cząstek przebiega przez rozdzielnię (Switchyard) na poszczególne linie eksperymentalne: Mezon, Neutrino, Proton.

Na liniach eksperymentalnych wiązki uderzając w cel zostają rozbite, a następnie badane są elementy powstałe po rozbiciu. Tego rodzaju eksperymenty nazywane są „fix target”.

Drugim bardziej efektywnym rodzajem eksperymentów jest „collision”, czyli zderzenie akumulowanych przez P Source antyprotonów z obiegającymi Tevatron protonami. Na rys. 1 pokazano miejsca zderzeń: B0 Detector i D0 Detector. W tych dwóch potężnych urządzeniach badane są cząstki powstałe po kolizji. Oczywiście powyższy opis przeprowadzanych eksperymentów jest uproszczony i mało precyzyjny i nie może być traktowany jako rozważanie naukowe z dziedziny fizyki teoretycznej.

Aby wiązka elektronowa obiegła obliczone przez fizyków trajektorie, musi przebiegać wewnątrz elementów, które odchylają, skupiają, rozszczepiają i monitorują jej położenie. Elementy

te mają widoczne znaki tłówce o współrzędnych ściśle odniesionych do współrzędnych trajektorii wiązki, co pozwala na stałą kontrolę ich położenia w przestrzeni. Na zdjęciach 3, 4, 5 i 6 pokazano niektóre z elementów umieszczonych na liniach eksperymentalnych.

Konieczność stałej kontroli oraz ewentualnego korygowania przestrzennego położenia poszczególnych elementów tej potężnej „maszyny” umożliwia grupie geodezyjnej Laboratorium, kierowanej przez Terry'ego Sagera, wykonywanie wielu ciekawych i różnorodnych prac geodezyjnych. Obecnie na terenie Laboratorium budowane jest nowe urządzenie naukowe, potężny 150 GeV akcelerator cząstek elementarnych Fermi Main Injector (FMI). Urządzenie to będzie ulokowane na głębokości 10 m, w eliptycznym tunelu o długości obwodu 3319,419 m. Żądanie wysokich dokładności niezbędnych przy tego typu projektach ze szczególnym wskazaniem dokładności wyniesienia długości tunelu zainspirowało

grupę geodezyjną do szukania metod pomiaru, obliczeń i instrumentów mogących sprostać postawionemu zadaniu.

### Dokładność ustawienia elementów FMI

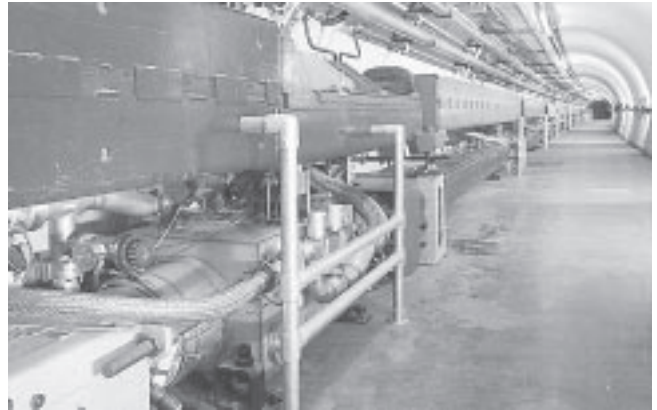
Dla zapewnienia sprawnego przebiegu doświadczeń naukowych wymagana jest wysoka globalna dokładność ustawienia elementów akceleratora FMI (dwustu ośmiu kwadropoli – magnesów skupiających wiązkę elektronową i trzystu czterdziestu czterech dipoli – magnesów odginających wiązkę elektronową). W lokalnym układzie maszyny dokładność ustawienia elementów nie powinna być gorsza niż  $\pm 2$  mm, zaś dokładność długości trajektorii wiązki po eliptycznym obwodzie –  $\pm 5$  mm. W tabeli 1 pokazano dokładności wzajemnego położenia elementów konieczne do zapewnienia wymaganej globalnej dokładności.

Tabela 1. Dokładności wzajemnego położenia elementów

Typ elementów	Horyz./Wysok.	Wdłuż obwodu	Nachylenie
Kwadropole	$\pm 0,025$ mm	$\pm 3$ mm	$\pm 0,5$ mrad
Dipole	$\pm 0,025$ mm	$\pm 3$ mm	$\pm 0,5$ mrad

### Naziemna osnowa geodezyjna

Rozwój metod pomiarowych i instrumentów, który nastąpił w geodezji w ostatnich latach, umożliwił zautomatyzowanie prac pomiarowych i obliczeniowych, a staranny dobór metod i analiz wstępnych pozwolił na minimalizację wszystkich ewentualnych czynników mogących wpłynąć na dokładność pomiaru i obliczeń. Obliczenia teoretycznych współrzędnych FMI wykazały, że dla uzyskania oczekiwanych przez projektantów do-

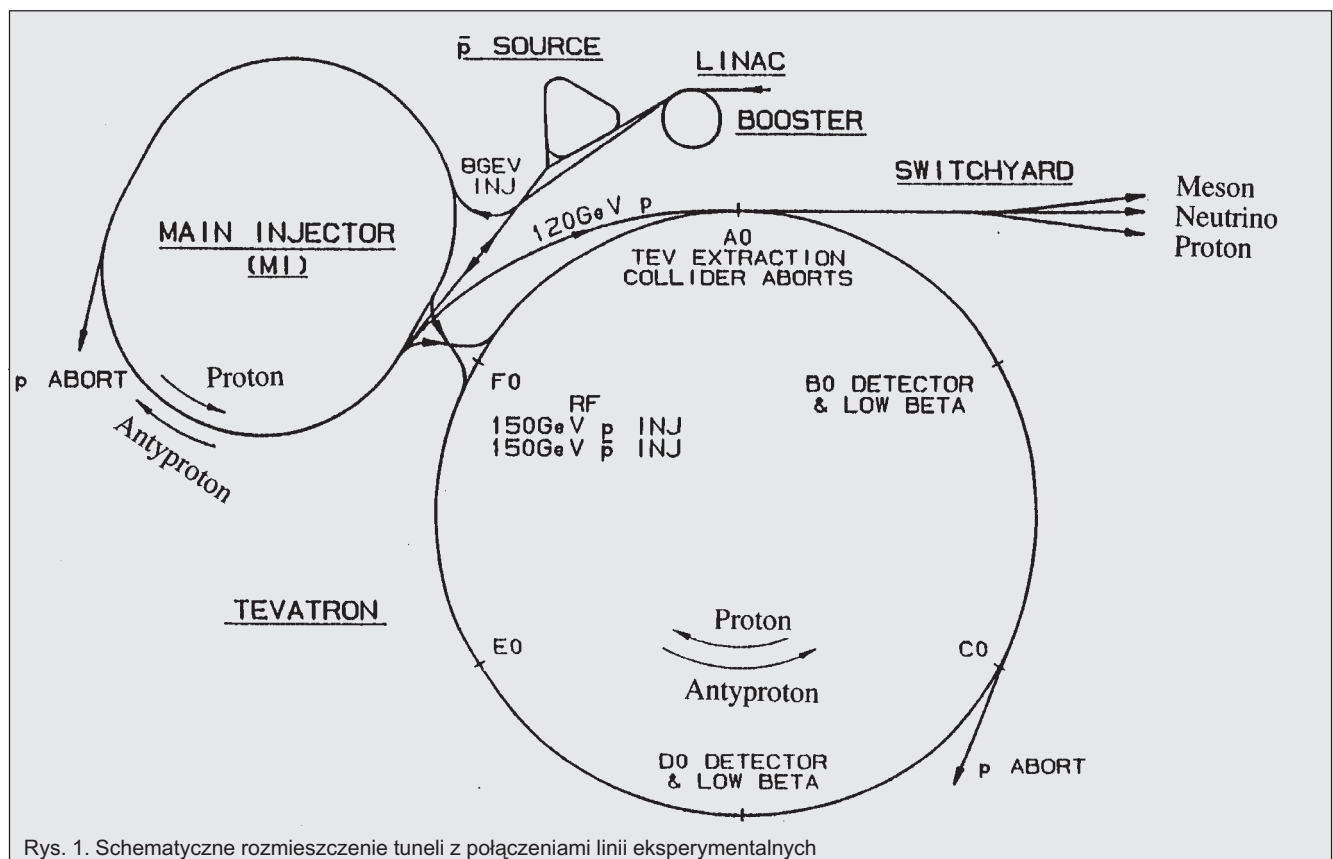


Fot. 4. Widok ogólny tunelu Tevatron

kładności niezbędne jest uwzględnienie wpływu kształtu Ziemi i grawitacji ziemskiej. Pierwszą fazą projektu było znalezienie zależności pomiędzy przestrzennym położeniem istniejącego i pracującego akceleratora cząsteczek elementarnych zwanego Tevatron oraz projektowanego FMI. Badania wykazały, że tunele Tevatronu i FMI położone są na dwóch różnych płaszczyznach prostopadłych do lokalnych wektorów grawitacji.

Wektor Tevatronu przyłożony jest w centrum koła, którym w przybliżeniu jest tunel tej maszyny, wektor drugiej płaszczyzny jest położony ekscentrycznie względem środka eliptycznego tunelu FMI. Dla zapewnienia maksymalnej dokładności wykonywanego projektu obliczono lokalny model geoidy na obszarze Laboratorium.

Kontrolna osnowa geodezyjna będąca siecią odniesienia dla konstrukcji tunelu i instalacji elementów FMI składa się z dziesięciu precyzyjnie zastabilizowanych i wyznaczonych punktów



Rys. 1. Schematyczne rozmieszczenie tuneli z połączeniami linii eksperymentalnych

geodezyjnych. Ten dobrze wyznaczalny układ centralny (dziesięć punktów rozmieszczono wokół budowanego metodą odkrywkową tunelu, dziesiąty umieszczony został w centrum elipsy) jest częścią głównej sieci pokrywającej teren Laboratorium (patrz rys. 2). Punkty osnowy zastabilizowano w 1992 roku, a pomiary kontrolne przeprowadzane periodycznie (każdego roku) wykazały dużą stabilność i dokładność położenia punktów (błąd nie przekroczył  $\pm 1$  mm).

Pomiary, obliczenia i analizy dokładnościowe przeprowadzono w odzorowaniu podwójnym stereograficznym używając elipsoidy GRS80 (Geodetic Reference System 1980) z uwzględnieniem lokalnie obliczonego modelu geoidy. Kombinacja pomiarów GPS z pomiarami niwelacji precyzyjnej i istniejącymi danymi geoidy (GEOID 93) pozwoliły na niezależną kontrolę obliczeń lokalnego kształtu geoidy. Dodatkowo na kilku punktach sieci przeprowadzono obserwacje astronomiczne jako kolejne kontrole teoretycznych obliczeń. Ze względu na żądania wysokich dokładności projekt wymagał wnikliwych i różnorodnych analiz. Rozważono wiel-

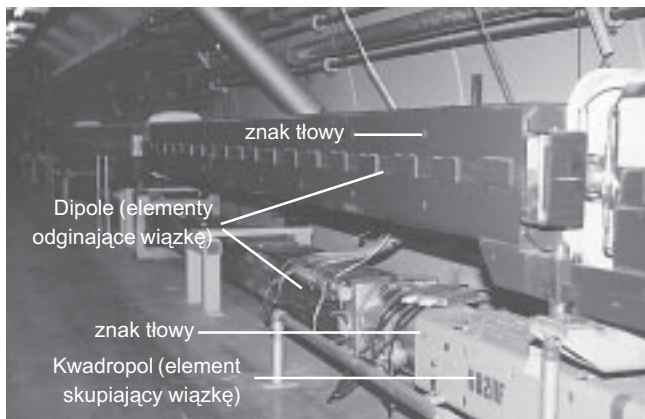
kości poprawek wysokościowych i azymutalnych, a także wpływ różnic pomiędzy powierzchnią elipsoidy i geoidy.

Do pomiaru naziemnej siatki odniesienia użyto następujących instrumentów geodezyjnych:

1. GPS – Trimble 4000se Geodetic Survey (odbiornik dwuczęstotliwościowy),
2. pomiary odległości – precyzyjny instrument Kern Mekometer ME 5000,
3. pomiary kątowe – teodolity KernE-2 i WildT3,
4. pomiary niwelacyjne – Kern N3 i Leica NA3000,
5. przeniesienie współrzędnych punktów naziemnych na powierzchnię tunelu – precyzyjny pionownik optyczny Kern ZN. Naziemną sieć punktów kontrolnych nawiązano do precyzyjnej mikrosieci kontrolnej tunelu. Wymagało to oczywiście zagęszczenia istniejącej osnowy przez pomiar dodatkowych 10 punktów (wyjść), które w wypadku konstrukcji FMI mają postać szybów. Pozwoliły one na przeniesienie współrzędnych punktów naziemnych z dokładnością 0,1 mm. Punkty te służą jako



Rys. 2. Główna osnowa geodezyjna Laboratorium w układzie lokalnym (DUSAF)



Fot. 5. Elementy tunelu Tevatron

punkty kontrolne dla podziemnej osnowy geodezyjnej będącej bazą dla precyzyjnego ustawienia elementów FMI.

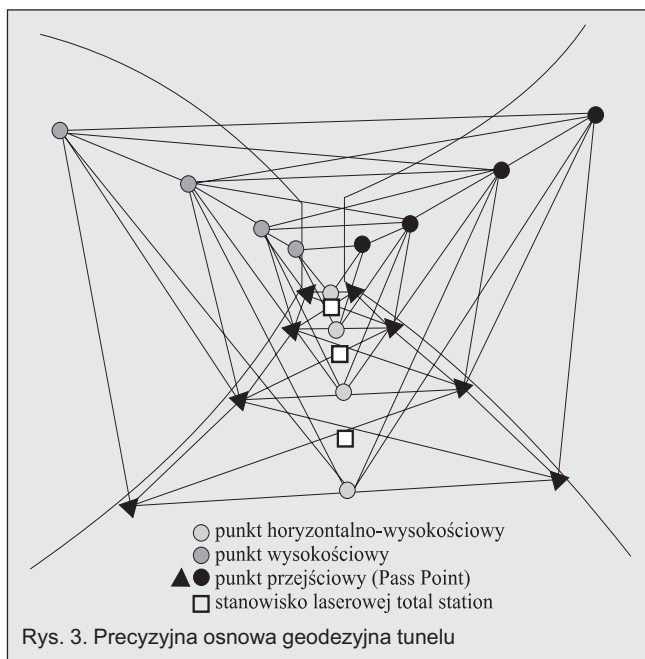
### Osnowa geodezyjna tunelu

Osnowa tunelu składa się z 200 punktów kontrolnych zastabilizowanych w precyzyjnie wywierconych otworach w betonowej podłodze tunelu. Punkty rozmieszczone w osi tunelu w odległości co 17 m. Kontrolne punkty wysokościowe zastabilizowano na ścianie tunelu pomiędzy co drugim punktem ziemnym. Projekt stabilizacji punktów kontrolnych umożliwia umieszczenie zarówno przyrządów laserowej total station, jak i sygnałów konwencjonalnych instrumentów geodezyjnych.

Obliczenia i analizy wstępne przeprowadzono w lokalnym odwzorowaniu podwójnym stereograficznym tak dobranym, aby współczynnik skali był w rejonie tunelu jak najbliższy 1. Schematycznie osnowę tunelu pokazano na rysunku 3. Wstępne analizy powyższej sieci wykazały, że błąd położenia punktu nie powinien przekroczyć  $\pm 0,2$  mm.

Osnowa tunelu mierzona jest (pomiar w toku) przy użyciu takich instrumentów geodezyjnych jak:

1. laserowa total station marki Chesapeake,
2. pomiary odległości – precyzyjny instrument Kern Mekometer ME 5000,



Rys. 3. Precyzyjna osnowa geodezyjna tunelu

3. pomiary kątowe – teodolity KernE-2,
  4. pomiary niwelacyjne – Kern N3 i Leica NA 3000,
  5. pomiary azymutów – precyzyjny żyroteodolit Gyromat-2000.
- Pomiar jest przeprowadzany sektorami i nawiązywany do precyzyjnie przeniesionych punktów osnowy naziemnej. Każdy z sektorów mierzony za pomocą Chesapeake (patrz zdj. 8 i 9) średnio z 21 stanowisk (18 obserwacji na każdym stanowisku) wyrównywany jest metodą blokową razem z obserwacjami kątowno-liniowymi. Wyrównane współrzędne będą użyte jako punkty kontrolne do ustawienia składowych elementów FMI. Niezależnie wysokości punktów kontrolnych wyznaczono metodą



Fot. 6. Elementy rozszczepiające wiązkę cząstek elementarnych

niwelacji precyzyjnej, a analiza dokładności po wyrównaniu wykazała, że błąd pomiaru nie przekroczył 0,4 mm na kilometr.

### Ustawienie elementów FMI

Cały proces ustawienia głównych elementów „maszyny” FMI będzie przeprowadzony przy użyciu laserowej total station. Punkty tłowe magnesów mają określone przez producenta współrzędne w układzie lokalnym, a budowa elementów pozwala na precyzyjne umieszczenie przyrządów na punktach tłowych. Specjalnie napisany program transformuje układ lokalny na układ punktów kontrolnych tunelu. Następnie przez kolejne iteracje magnes zostaje umieszczony w żądanych punktach na trajektorii wiązki. Współrzędne tłowe elektronicznych urządzeń monitorujących położenie wiązki są wyznaczone przez grupę geodezyjną. Sposób pomiaru pokazano na zdjęciu 7.

Pomiar przeprowadzany jest w lokalnym układzie współrzędnych, gdzie osie X i Y wyznaczają prostopadłe ustawione szyny inwar-



Fot. 7. Pomiar współrzędnych tłowych (metoda optyczna)



Fot. 8 i 9. Laserowa Total Station Chesapeake



we, płaszczyznę XY tworzy precyzyjnie spoziomowany granitowy stół. Na szynach X i Y umieszczone na specjalnych wózkach „teodolity” firmy Brunson. Droga przesuwu dokładnie mierzona na inwarowych podziałkach wyznacza wielkości współrzędnych X,Y, ponieważ osie instrumentów są prostopadłe do inwarowych szyn. Trzeci nieruchomy instrument kontroluje prostopadłość lokalnego układu osi. Instrumenty te nie posiadają kół odczytowych i mogą odkładać tylko kąty proste i przesuwac równoległe osie celowe. Prostopadłość i kolinearność osi celowych wyznacza się za pomocą optycznej kolimacji światła. Po wyznaczeniu współrzędnych tłowych elementy mogą być umieszone w tunelu analogicznie jak elementy główne w żądanych punktach trajektorii wiązki.

### Zakończenie

W kierowanym przez dr. Johna Peoples Laboratorium pracuje wielu sławnych naukowców z całego świata (w tym z Polski), a wieloletnim dyrektorem był laureat Nagrody Nobla z dziedziny fizyki teoretycznej dr Leon Lederman.

**Leon Lederman** (ur. 1922) – fizyk amerykański specjalizujący się w badaniach cząstek elementarnych. 1979-89 dyrektor Laboratorium im. E. Fermiego w Batavii (Illinois); 1956 odkrył mezon  $K_2^0$ , 1957 przeprowadził obserwacje niezachowania parzystości w rozpadach pionów i mionów; 1962 wraz z J. Steinbergerem i M. Schwartzem, wykonał eksperyment wykazujący istnienie 2 typów neutrin (elektronowego i mionowego), za co w 1988 r. otrzymali wspólnie Nagrodę Nobla. W ostatnich latach zajmuje się urządzeniami do przyspieszania cząstek elementarnych.

Przeprowadzane eksperymenty wymagają kooperacji różnych gałęzi wiedzy, w tym geodezji, która ze względu na wymagane rosnące dokładności odgrywa coraz większą rolę.

### Literatura:

1. V. Bocean, B. O.' Oshinowo, T. M. Sager, *Survey and alignment overview Fermilab Main Injector Ring*, Proceedings of the Fourth International Workshop on Accelerator Alignment (Nov 14-17 1995 KEK, Tsukuba Japan).
2. G. J. Wójcik *Adjustment of FMI: Comparison of 1992, 1993, and 1994 Networks Fermilab* (nie publikowane).
3. V. Bocean, *Geodesy and Alignment Concepts for Fermi Main Injector Fermilab* (nie publikowane).
4. *The Fermilab Main Injector Technical Design Handbook*, Fermi National Accelerator Laboratory, 1994.

Fotografie 1, 2, 4, 7, 8 i 9 ze zbiorów autora, zdjęcia 3, 4, 5 i 6 wykonał Gene Kiveighu.

**George Jerzy Wójcik** jest geodetą-fizykiem, m.in. absolwentem Wydziału Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej. Z dwudziestu lat spędzonych poza krajem, kilka ostatnich pracował w Fermi National Accelerator Laboratory w Batavii (Illinois).

## Kwarki

Kwarki – składniki protonów, neutronów i innych hadronów; są cząstkami punktowymi, o spinie  $1/2$ , liczbie barionowej  $1/3$  i ładunkach elektrycznych będących ułamkiem  $1/3$  lub  $2/3$  ładunku elementarnego  $e$ . Obecnie znanych jest 6 rodzajów kwarków, zwanych „zapachami”. Oddziaływania między kwarkami występują, ponieważ są one obdarzone pewną nową właściwością zwaną ładunkiem kolorowym lub ko-

lorem (termin „kolor” jest stosowany umownie). Kolor kwarka może być „czerwony”, „niebieski” lub „zielony” (antykwariki niosą antykolor, a więc mogą być „antyczerwone”, „antyniebieskie” i „antyzielone”). Siły między kolorowymi ładunkami rosną wraz ze wzrostem odległości, dlatego próba odseparowania kwarków od siebie powoduje jedynie wzrost energii pola kolorowego między nimi. Gdy energia ta przekracza pewną wartość, to może na jej koszt zostać wyprodukowana nowa para kwark-antykwar. Tę niemożliwość odseparowa-

nia pojedynczego kwarka nazywa się uwięzieniem koloru. Hadrony jako całość nie wykazują ładunku kolorowego, gdyż ładunki kolorowe składających się na nie kwarków walencyjnych neutralizują się. Mówi się, że hadrony są „białe”. Kwarkowy model hadronów zaproponowali w 1964 r. M. Gell-Mann i G. Zweig. W ciągu 10 następujących lat odkryto 5 z 6 rodzajów przewidzianych teorią kwarków. Ostatni – szósty pozostawał nieuchwytny aż do 1994 r., kiedy to zaobserwowano go właśnie w FermiLab.